

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO INTERLAMINAR DE COMPÓSITOS FABRICADOS POR MOLDAGEM DE TRANSFERÊNCIA DE RESINA¹

Wanderley Ferreira de Amorim Júnior²

Gustavo Queiroz Chaves³

Verônica Maria de Araújo Calado⁴

Fernando Luiz Bastian⁵

Resumo

A Moldagem por Transferência de Resina ou RTM (*Resin Transfer Molding*) constitui um promissor processo de fabricação de materiais compósitos. O objetivo deste trabalho é o estudo da influência da variação da fração volumétrica de fibra na resistência ao cisalhamento interlaminar de compósitos fabricados por moldagem de transferência de resina (*Resin Transfer Molding, RTM*). Os materiais usados nos experimentos foram: tecido de fibra de vidro e resina éster-vinílica (DERAKANE 411-350) com catalisador Butanox e acelerador CoNaP. Três tipos de preforma (reforços de fibra no formato da peça) foram usadas: 28, 30 e 32 camadas de tecido. As preformas foram posicionadas no interior do molde de RTM, constituído por um espaçador de aço com espessura constante de 25,4 mm. Os compósitos fabricados foram avaliados por análise de imagens digitais, pelo cálculo da densidade e por ensaios de cisalhamento interlaminar de acordo com a norma D2344 da ASTM. Baseando-se nos experimentos e análises realizadas, pode-se concluir que: a variação da fração volumétrica de fibra das placas produzidas por RTM controlam não só o tempo de preenchimento do molde, conseqüentemente a taxa de produção, como a porosidade presente nos compósitos fabricados. A placa compósita fabricada com a preforma de 30 camadas (aproximadamente 46% de fração volumétrica de fibra) apresentou tempo de preenchimento intermediário entre as duas outras preformas, menor porosidade e maiores valores de resistência ao cisalhamento interlaminar.

Palavras-chave: Materiais compósitos; Processamento de materiais compósitos; Moldagem por transferência de resina; Resistência ao cisalhamento Interlaminar.

INTERLAMINAR SHEAR STRENGTH OF COMPOSITE MANUFACTURED BY RESIN TRANSFER MOLDING

Abstracts

Resin Transfer Molding (RTM) constitutes a promising process of composite material manufacturing. The objective of this work is to study experimentally the influence of fiber volume fraction on the interlaminar shear strength of composites manufactured by Resin Transfer Molding (RTM). The materials used in the experiments were: fiber glass fabric (1100 g/m²) and vinylester resin DERAKANE 411-350 with Butanox initiator (1,5%) and CoNaP accelerator (0,3%). The preform had 32, 30 and 28 layers of fiber glass reinforcements. The preforms were placed in the RTM mold, consisting of a steel spacer with constant thickness of 25.4 mm. Various techniques were used in order to analyse the composite processing: digital images analyses, density and Interlaminar Shear Strength calculation, in accordance with ASTM D2344. By analyzing the experiments, it can be concluded that: the fibre volume fraction of the composite manufactured by RTM controls the mold filling time and composite porosity. The preform with 30 layers presented less porosity, no variation in Interlaminar Shear Strength and lower filling time than preform with 32 layers and greater filling time than preform with 28 layers.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Doutorando – COPPE –PEMM--Universidade Federal do Rio de Janeiro*

³ *M.Sc.-Centro Tecnológico do Exército*

⁴ *D.Sc.-Escola de Química - Universidade Federal do Rio de Janeiro*

⁵ *Ph.D. – COPPE –PEMM--Universidade Federal do Rio de Janeiro*

INTRODUÇÃO

A Moldagem por Transferência de Resina ou RTM (Resin Transfer Molding) constitui um promissor processo de fabricação de materiais compósitos. Shojaei *et al.*⁽¹⁾ dividem as operações do processamento por RTM em duas categorias independentes: operações de molde aberto (*open mold operation*), como limpeza do molde, aplicação de desmoldante, carregamento do molde com a preforma, e operações com o molde fechado (*closed mold operation*), que consistem na injeção e processo de cura da resina. Considera-se a fase de injeção independente da fase de cura já que geralmente a segunda fase só começa com o término da primeira. Embora as operações de molde aberto possam ocupar um significativo tempo, as operações de molde fechado são realmente as que têm o potencial de controlar a taxa de produção, custo e performance da peça produzida. Entretanto, para se conseguir o máximo de propriedades mecânicas dos compósitos produzidos por RTM, cada fibra individual deve estar completamente “molhada” pela resina líquida, minimizando a quantidade de vazios. Pearce *et al.*⁽²⁾ e Abraham e McIlhagger⁽³⁾ afirmam que macrovazios podem ser gerados pela coalescência das frentes de fluxos; portanto, a dinâmica do fluido no interior do molde é muito importante para desempenho do processamento por RTM. Desempenho e processabilidade devem caminhar juntos no projeto de peças por RTM; a otimização desses dois parâmetros é necessária para se obter produtos econômicos e de alta qualidade.

A variação da fração volumétrica de fibras (V_f) da preforma é uma importante propriedade para o processamento por RTM, já que da mesma depende a porosidade da preforma, conseqüentemente o tempo de enchimento do molde e a taxa de produção. A Resistência ao Cisalhamento Interlaminar de um compósito é um forte indicador da qualidade e sucesso de um processamento, já que o valor dessa resistência está relacionado com as propriedades da matriz e da resistência ao cisalhamento da interface fibra-matriz. O objetivo deste trabalho é o estudo da influência da variação da fração volumétrica de fibra na Resistência ao Cisalhamento Interlaminar de compósitos fabricados por Moldagem de Transferência de Resina.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais usados nos experimentos foram: tecido de fibra de vidro AF 0090 (1100 g/m²), fabricado pela Fibertex, e resina éster-vinílica DERAKANE 411-350 com catalisador Butanox (1,5%) e acelerador CoNaP (0,3%). As placas de material compósito eram constituídas de 32, 30 e 28 camadas de fibra de vidro com área de 238 x 238 mm² e espessuras médias de 25,12, 25,03 e 24,39 mm respectivamente. A estação de processamento de RTM é de concepção própria, sendo o molde constituído de um espaçador de aço 1045 com 300 x 300 mm² de área e espessura de 25,4 mm (1”) e de duas placas de acrílico de 300 x 300 x 30 mm que formam as tampas superior e inferior do molde. Nos centros dessas tampas se encontram respectivamente, o ponto de alimentação da resina e de vácuo, Figura 1(a). Foi usada pressão atmosférica e pressão de vácuo de 300 mbar.

A Resistência ao Cisalhamento Interlaminar (*Interlaminar Shear Strength, ILSS*) foi obtida pelo ensaio de flexão curta em três pontos, segundo a norma ASTM D 2344/D2344M. Foi usada a máquina de ensaios EMIC, modelo DL 10000, com célula de carga de 100 kN disponível na COPPE/UFRJ, a uma taxa de deslocamento constante igual a 1 mm/min. Os corpos de prova possuíam comprimento de 153 mm, largura de 25,4mm (1”) e espessura de acordo com o

número de camadas do compósito. Foram ensaiados 5 corpos de prova retirados de cada uma das placas compósitas processadas, Figura 1(b) mostra a posição de retirada de cada um desses corpos de prova nessas placas, também foram realizadas análises de imagens digitais, cálculo da densidade e da quantidade de resina dos mesmos.

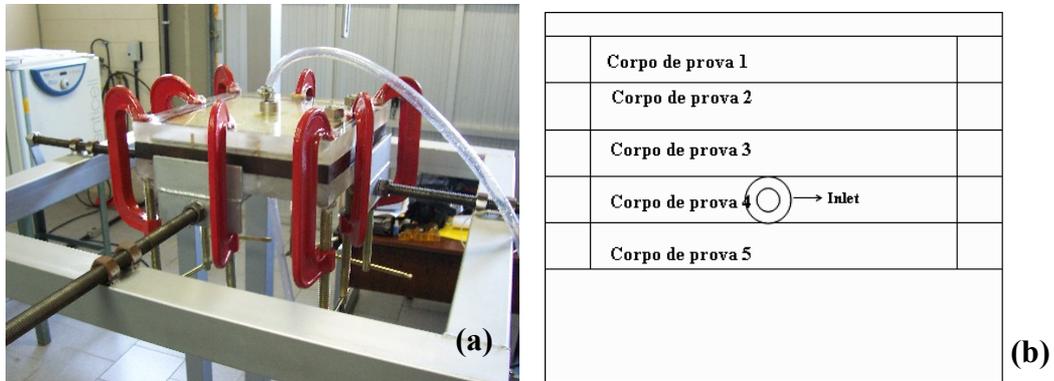


Figura 1 – (a) Molde de RTM e (b) esquema que mostra a posição de retirada dos corpos de prova das placas compósitas processadas por RTM.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta os corpos de prova 3, 4 e 5 da placa compósita de 28 camadas após o ensaio de cisalhamento interlaminar.

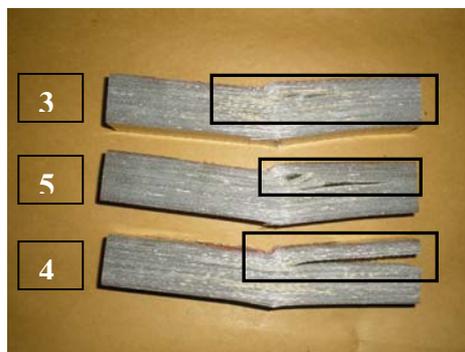


Figura 2 – Dano após o ensaio de cisalhamento interlaminar dos corpos de prova 3, 4 e 5 da placa compósita com 28 camadas.

Aparentemente, as trincas foram criadas e propagadas a partir dos vazios presentes na parte central desses compósitos, assinalados na Figura 2, corroborando com Costa *et al.*⁽⁴⁾

As Figuras 3 e 4 apresentam as superfícies laterais dos corpos de prova retirados dos compósitos de 28 e 32 camadas, respectivamente.

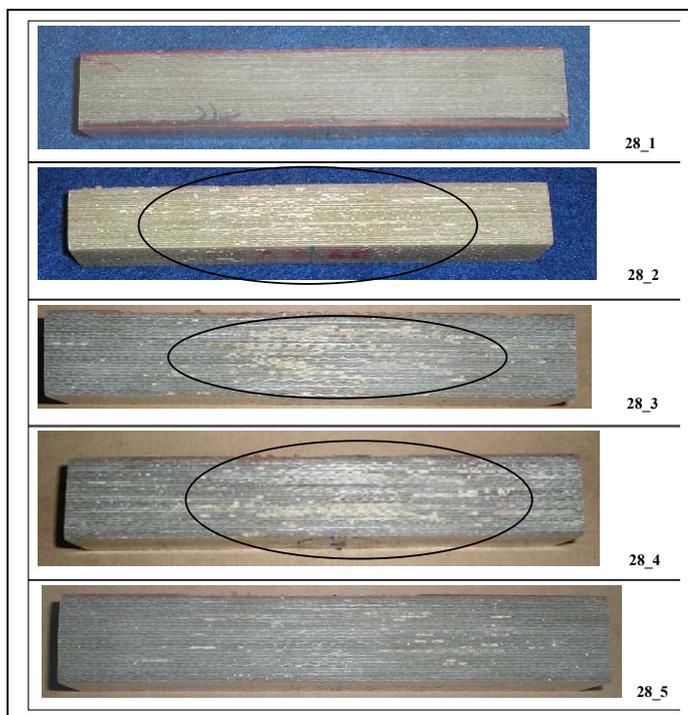


Figura 3 - Corpos de prova para ensaio ILSS retirados do compósito de 28 camadas.

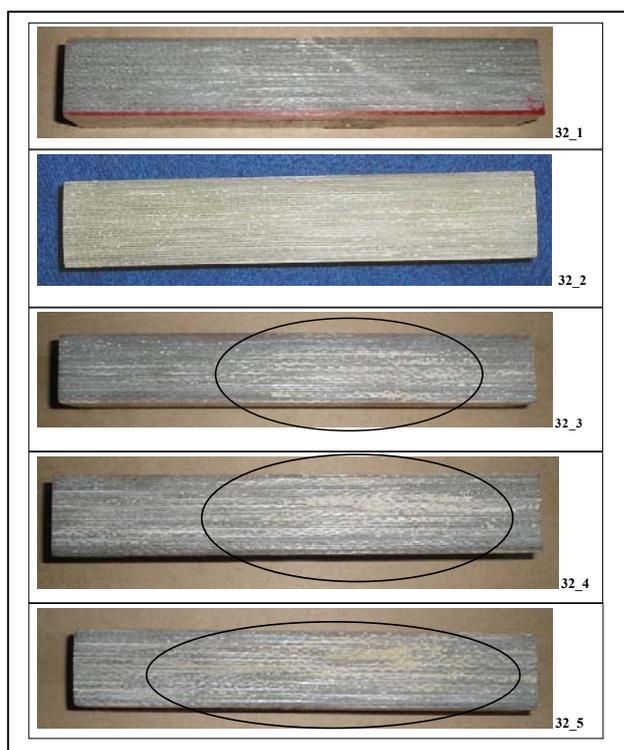


Figura 4 - Corpos de prova para ensaio ILSS retirados do compósito de 32 camadas.

Nos corpos de prova retirados das placas compósitas de 28 e 32 camadas, foram observadas duas regiões distintas: na parte central dos mesmos vazios achatados e alongados na direção longitudinal das fibras ao longo da interface fibra/matriz, assinalados nas Figuras 3 e 4 por elipses. Nas bordas direita e esquerda, observou-se a presença de pequenos e dispersos vazios. Em ambas as placas compósitas, os vazios achatados aumentam em direção ao centro da placa.

Já os corpos de prova retirados da placa compósita de 30 camadas não apresentam esse comportamento: os vazios achatados não aumentam em direção ao centro da placa, ver Figura 5; ou seja, os vazios não aumentam da borda para o centro da placa. Os vazios presentes nesses corpos de prova são pequenos e dispersos de formato achatado ou não.

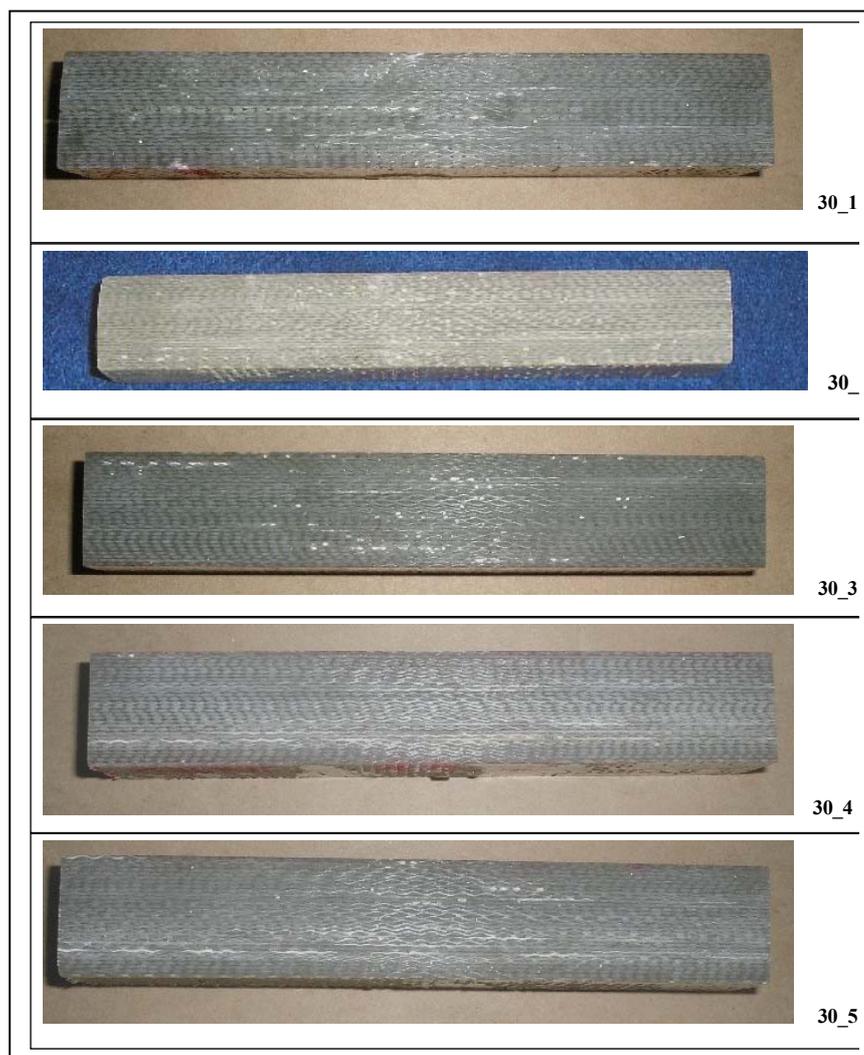


Figura 5 - Corpos de prova para ensaio ILSS retirados do compósito de 30 camadas.

Esse aumento da quantidade de vazios nos corpos de prova das placas compósitas de 28 e 32 camadas segue a direção do fluxo de preenchimento da resina no interior da preforma dos compósitos processados por RTM, da borda para o centro, sendo o centro de todos os corpos de prova a região de coalescência das frentes de fluxo com o conseqüente aprisionamento de bolsas de ar. Os gráficos das Figuras 6 e 7 apresentam a variação da densidade e da quantidade de resina para os corpos de prova ensaiados por ILSS e retirados das placas de 28, 30 e 32 camadas.

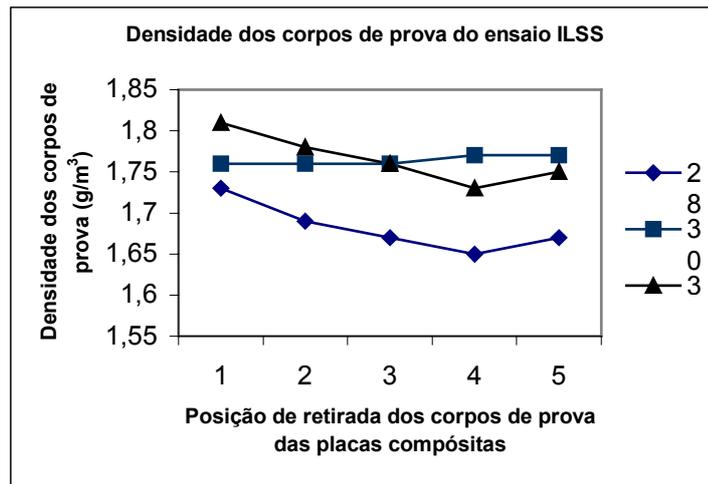


Figura 6 – Variação da densidade dos corpos de prova ensaiados por ILSS.

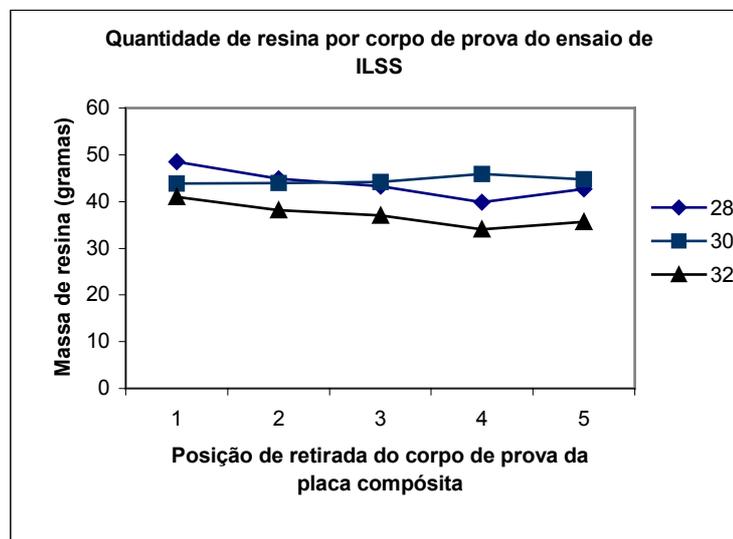


Figura 7 - Variação de quantidade de resina dos corpos de prova ensaiados por ILSS.

A densidade e a quantidade de resina diminuem em direção ao centro das placas compósitas de 28 e 32 camadas; já a densidade e a quantidade de resina da placa compósita de 30 camadas não diminuem em direção ao centro da placa, Figuras 6 e 7, significando uma maior homogeneidade para a placa compósita de 30 camadas.

O gráfico da Figura 8 apresenta o resultado do ensaio de Resistência Interlaminar ao Cisalhamento para os corpos de prova retirados das placas compósitas processadas por RTM com 28, 30 e 32 camadas.

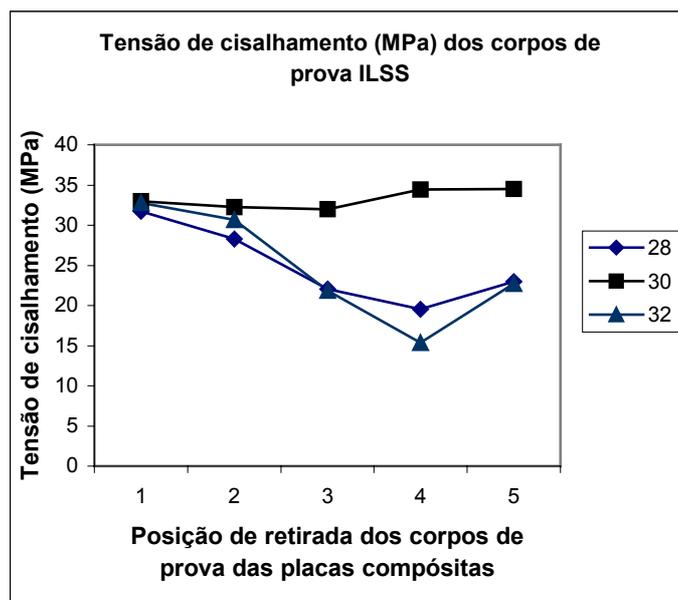


Figura 8 - Gráfico da variação da Tensão Cisalhamento Interlaminar dos corpos de prova ensaiados por ILSS.

Como pode ser observado, a Resistência Interlaminar ao Cisalhamento dos corpos de prova das placas compósitas de 28 e 32 camadas diminui em direção ao centro da placa, no sentido do preenchimento da mesma. Já os corpos de prova da placa compósita de 30 camadas não sofrem diminuição da sua Resistência Interlaminar ao Cisalhamento, Figura 8. Costa *et al.*⁽⁴⁾ afirmam que a diminuição no valor da Resistência ao Cisalhamento Interlaminar está relacionada diretamente com o aumento do conteúdo de vazios nos compósitos, conseqüentemente a placa compósita de 30 camadas apresentou melhor interação fibra/resina quando comparada às outras duas placas compósitas (28 e 32 camadas).

As razões da existência da melhor interação fibra/resina da placa compósita de 30 camadas com relação aos compósitos de 28 e 32 camadas são de origens diferentes. No caso da placa de 28 camadas, provavelmente o menor tempo de preenchimento da placa compósita de 28 camadas com relação à de 30 camadas impediu a adequada retirada de ar da preforma da primeira e conseqüentemente aprisionou uma maior quantidade de bolsas de ar, ver Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação do tempo de preenchimento das placas de 28 e 30 camadas

Placa compósita	Tempo de preenchimento(s)
28 camadas	47
30 camadas	112

No caso da placa compósita de 32 camadas, a queda nos valores de Resistência Interlaminar ao Cisalhamento está relacionada com a falta de resina no interior da preforma. Essa falta de resina pode ser verificada comparando-se a quantidade de resina na placa compósita de 30 camadas com a de 32 camadas, ver Tabela 2, e depois observando as laterais de ambas as placas.

Tabela 2 - Quantidade de resina por placa compósita

Placa compósita	Quantidade de resina por placa
30 camadas	766 gramas
32 camadas	760 gramas

A Tabela 2 mostra que as placas de 30 e 32 camadas têm aproximadamente a mesma quantidade de resina, mas a Figura 7 mostra que enquanto a placa compósita de 30 camadas possui homogeneidade na sua quantidade de resina, o mesmo não acontece com o compósito de 32 camadas na direção do centro da placa. Confrontando os dados da Tabela 2 e do gráfico da Figura 7 surge então o seguinte questionamento: porque a resina não atingiu o centro da placa de 32 camadas? Para responder a essa pergunta, deve-se analisar as Figuras 9(a) e 9(b).

A Figura 9(a) mostra que a resina que falta ao longo da direção do centro do compósito de 32 camadas ficou retida nas bordas laterais (em todas quatro) da mesma, não conseguindo penetrar no interior da preforma. Para comparação, pode-se observar a lateral da placa compósita de 30 camadas livre de resina, Figura 9(b).

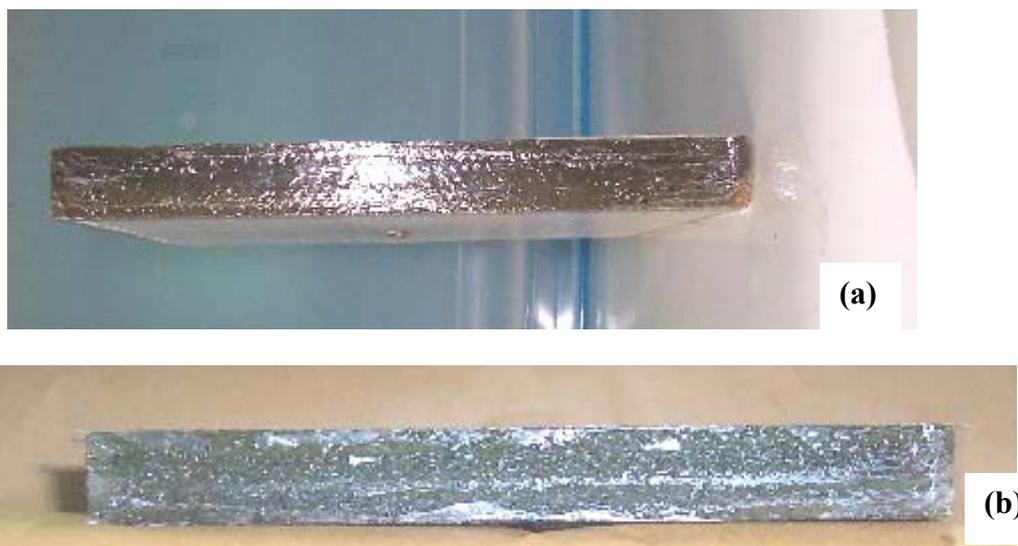


Figura 9 - Laterais das placas compósitas de 32(a) e de 30 camadas (b).

A placa compósita de 32 camadas, por possuir maior número de camadas, apresentou menor porosidade da sua preforma quando comparada com a placa compósita de 30 camadas. Como ambas estão submetidas à mesma diferença de pressão, a menor porosidade da primeira impediu que a resina chegasse ao interior da preforma de forma homogênea.

CONCLUSÃO

Baseando-se nos experimentos e análises realizadas e para o sistema de fibra/resina usado neste trabalho, pode-se concluir que:

- A variação do número de camadas de fibra das placas produzidas por RTM controla não só o tempo de preenchimento do molde, conseqüentemente a taxa de produção, como a qualidade da interface fibra/matriz nos compósitos fabricados.
- A placa compósita fabricada com a preforma de 30 camadas (aproximadamente 46% de fração volumétrica de fibra) apresentou tempo de preenchimento intermediário entre as duas outras preformas, melhor qualidade da interface fibra/matriz e maiores valores de Resistência ao Cisalhamento Interlaminar.

Agradecimentos

Agradecimento ao CNPq e ao CTEEx pelo apoio financeiro e técnico respectivamente.

REFERÊNCIAS

- 1 SHOJAEI A., et al. Simulation of the three-dimensional non-isothermal mold filling process in resin transfer molding. *Composites Science and Technology*, v. 63, p. 1931–1948, 2003.
- 2 PEARCE, N. R. L., GUILD, F. J., SUMMERSCALES, J. An investigation into the effects of fabric architecture on the processing and properties of fibre reinforced composites produced by resin transfer moulding. *Composites Part A29A*, p.19-27, 1998.
- 3 ABRAHAM, D.; MCLLHAGGER, R. Investigations into various methods of liquid injection to achieve mouldings with minimum void contents and full wet out, *Composites Part A*, v. 29A, p.533-539, 1998.
- 4 COSTA, M. L., ALMEIDA, S. F. M., REZENDE, M. C. Resistência ao Cisalhamento Interlaminar de compósitos com resina Epóxi com diferentes arranjos das fibras na presença de vazios. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v.11, n.4, p.182-189, 2001.
- 5 MASTBERGEN, D.B. Simulation and testing of resin infusion manufacturing processes for large composite structures, dissertação de mestrado. Montana State University, Bozeman, Montana, julho, 2004.